Protonenemission von Aluminium

angeregt durch

α-Strahlen von Radium C und Thor C.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt

von

Otto Haxel

aus Neu-Ulm a. D.

1933

Dekan: Professor Dr. E. Hennig
Referent: Professor Dr. H. Geiger

Tag der mündlichen Prüfung: 1. Juni 1933

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meiner lieben Mutter

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548026_0031

Unter Benutzung eines Zählrohres, das nur auf α- bzw. *H*-Strahlen ansprach (§ 3), wurde die Protonenemission von Aluminium untersucht, wobei statt des sonst verwendeten Poloniums Radium C und Thor C als Strahlenquellen dienten. Die zur Verfügung stehenden α-Strahlenpräparate, speziell das Thor C-Präparat, waren relativ schwach. Trotz der dadurch bedingten geringen Protonenzahl pro Minute konnte eine befriedigende Meßgenauigkeit erzielt werden, weil die Apparatur automatisch arbeitete und Dauerregistrierungen zuließ. Die Meßergebnisse, die in § 9 zusammengestellt sind, geben Aufschluß über die Reichweite der Protonen in Abhängigkeit von der Reichweite der α-Strahlen.

§ 1. Einleitung. Die Protonenemission leichter Elemente unter der Einwirkung von α-Strahlen wurde von Rutherford[1]) entdeckt und erstmalig von ihm, gemeinsam mit Chadwick[2]) näher untersucht. Sie fanden dabei, daß bei Aluminium trotz Verwendung einer einheitlichen α-Strahlenenergie die emittierten Protonen verschiedene Reichweiten besitzen. Die geringe Ausbeute an Protonen erlaubte es ihnen jedoch nicht, eine hohe Meßgenauigkeit zu erzielen, da jede Verbesserung der Versuchsgeometrie mit einem Intensitätsverlust erkauft werden muß. Auch ist das Zählen der Szintillationen von Protonen äußerst ermüdend, und ihre Zahl darf nicht wesentlich unter 10 pro Minute sinken, wenn verläßliche Mittelwerte erhalten werden sollen. Solche Intensitäten lassen sich aber mit den erreichbaren Präparatstärken nur in den wenigsten Fällen gewinnen.

Nachdem E. A. W. Schmidt[3]) festgestellt hatte, daß auch mit den α-Strahlen des Poloniums die Protonenemission angeregt werden kann, wurde die mühsame Szintillationsmethode durch elektrische Zählmethoden verdrängt. Mit diesen Methoden war die Möglichkeit geboten, exaktere Meßreihen durchzuführen. Zunächst erzielten Bothe und Fränz[4]) einen wesentlichen Fortschritt, indem sie zeigten, daß die Protonen des Bors in Gruppen von verschiedener Reichweite emittiert werden. Sie benutzten

---

[1]) E. Rutherford, Phil. Mag. **37**, 538, 571, 581, 1919; E. Rutherford u. J. Chadwick, Phil. Mag. **42**, 809, 1921.

[2]) E. Rutherford u. J. Chadwick, Proc. Cambridge Phil. Soc. **25**, 186, 1929.

[3]) E. A. W. Schmidt, Wiener Ber. **134** [2a], 385, 1925.

[4]) W. Bothe u. H. Fränz, ZS. f. Phys. **43**, 456, 1927; **49**, 1, 1928.

für ihre Untersuchungen einen Geigerschen Spitzenzähler. Entsprechende Versuche von Pose[1]), der das Duantenelektrometer nach Hoffmann benutzte, führten zu dem Ergebnis, daß auch bei Aluminium mehrere Gruppen zu beobachten sind; diese werden von ihm teilweise als Resonanzeffekt gedeutet; danach kann ein α-Teilchen nur dann in den Kern eindringen und ein Proton auslösen, wenn seine Energie in der Nähe der Energie eines Kernniveaus liegt. Chadwick, Constable und Pollard[2]) zeigten ebenfalls, daß die Protonen des Aluminiums in Gruppen emittiert werden, jedoch ist nach ihnen der Resonanzvorgang komplizierter, als Pose es annahm. Steudel[3]), sowie auch M. de Broglie und Leprince-Ringuet[4]) geben an, daß sie den Poseschen Resonanzeffekt nicht finden konnten.

Alle elektrischen Zählungen, soweit sie bisher erwähnt wurden, sind mit Polonium als Strahlenquelle ausgeführt. Polonium eignet sich als reiner α-Strahler für solche Messungen besonders gut. Es hat jedoch den Nachteil, daß die Reichweite seiner α-Strahlen relativ gering ist. Da die untere Grenze der Reichweite, bei der nach Chadwick und Constable[5]) noch Zertrümmerung nachzuweisen ist, 2,4 cm beträgt, kann die α-Strahlenenergie nur in dem Bereich von 2,4 bis 3,9 cm variiert werden. Will man α-Strahlen höherer Energie verwenden, so stehen hierfür Radium C (7 cm) und Thor C (8,6 cm) zur Verfügung. Man muß dann allerdings mit in Kauf nehmen, daß diese Elemente auch β- und γ-Strahlen emittieren. Den ersten erfolgreichen Versuch, die experimentellen Schwierigkeiten, die die β- und γ-Strahlung mit sich bringt, zu überwinden, hat Fränz[6]) bei seinen Messungen am Bor unternommen. Er benutzte einen Proportionalzähler[7]) in Verbindung mit einem Verstärker und einem Oszillographen hoher Eigenfrequenz.

Zu den im folgenden beschriebenen Messungen wurde ebenfalls eine elektrische Registriermethode benutzt, die Protonen in Gegenwart von β- und γ-Strahlen nachzuweisen gestattet. Es wurde damit die Protonenemission von Aluminium durch α-Strahlen von Radium C und Thor C untersucht. Das Ziel der Messungen war, die Abhängigkeit der Protonen-

[1]) H. Pose, Phys. ZS. **30**, 780, 1929; **31**, 943, 1930; ZS. f. Phys. **64**, 1, 1930; **67**, 194, 1931.

[2]) J. Chadwick, J. E. R. Constable u. E. C. Pollard, Proc. Roy. Soc. London (A) **130**, 463, 1931; J. Chadwick u. J. E. R. Constable, ebenda **135**, 48, 1932.

[3]) E. Steudel, ZS. f. Phys. **77**, 139, 1932.

[4]) M. de Broglie u. L. Leprince-Ringuet, C. R. **193**, 132, 1931.

[5]) l. c.

[6]) H. Fränz, ZS. f. Phys. **63**, 370, 1930.

[7]) H. Geiger u. O. Klemperer, ebenda **49**, 753, 1928.

reichweite von der Reichweite der primären α-Strahlen festzustellen. Aluminium wurde deshalb gewählt, weil über dieses Element schon ausführliche Arbeiten mit α-Strahlen von Polonium vorliegen. Zum Nachweis der Protonen wurde ein neuartiger Zähler benutzt, dessen Stromstöße in einen Verstärker geleitet wurden, der ein elektromagnetisch arbeitendes Addierwerk betrieb (§ 3).

§ 2. Beschreibung der Versuchsanordnung. Die radioaktive Strahlenquelle P (Fig. 1) bestand bei den meisten Versuchen aus einem kleinen Glaskügelchen, das mit etwa 10 Millicurie Emanation gefüllt war und das infolgedessen die drei Strahlengruppen der Emanation, des Radium A, und des Radium C emittierte. Diese trafen die als Kegelmantel ausgebildete Aluminiumfolie Al von 0,5 cm Luftäquivalent. Die von der Aluminiumfolie unter dem Bombardement der α-Strahlen emittierten Protonen konnten durch das Fenster F in den unten näher beschriebenen Zähler Z eintreten. Ein großer Teil der β- und γ-Strahlen wurde durch den Bleikegel Pb abgeschirmt. Dies war wichtig, da besonders die weichen aus dem Präparat stammenden β-Strahlen am meisten störten. Präparat und Folie befanden sich in einem evakuierbaren Raum, der durch eine Glimmerfolie von 6,5 cm Luftäquivalent verschlossen war. Absorptionsfolien A wurden bei F in den Weg der Protonen geschaltet. Diese Art der Präparat- und Folienanordnung wurde im wesentlichen schon von Fränz[1]) bei seinen Versuchen benutzt. Für alle Versuche hatte der Aluminiumkegel einen oberen Durchmesser von 12 mm und einen unteren Durchmesser von 20 mm, seine Höhe betrug 9 mm. Das Präparat war so angebracht, daß Protonen von 90 bis 150° gegen die α-Strahlrichtung in den Zähler eintreten konnten. Der Abstand von der Aluminiumfolie bis zur Zähleröffnung betrug mindestens 3,5 cm, so daß alle Protonen die Absorptionsfolie nahezu senkrecht durchsetzten. Die Reichweite der α-Strahlen wurde entweder durch eine zylindrisch

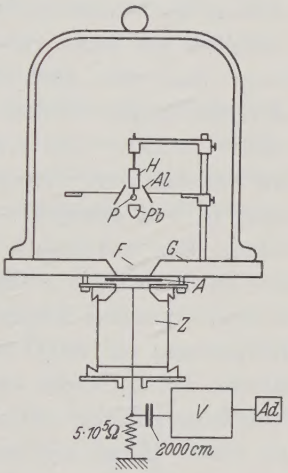

Fig. 1. Versuchsanordnung. P = α-Strahlenpräparat. H = Halter für das Präparat. Al = Aluminiumfolie. Pb = Bleikegel. F = Fenster. G = Grundplatte. A = Absorptionsfolie. Z = Zähler. V = Verstärker. Ad = Addierwerk.

[1]) H. Fränz, l. c.

gebogene Glimmerfolie herabgesetzt oder durch Einlassen von Sauerstoff in den sonst evakuierten Raum.

§ 3. Beschreibung des Zählers. Der hier benutzte Zähler war von den Herren Geiger und Zahn[1]) ausgearbeitet und mir zur Verfügung gestellt worden. Der Zähler besteht aus einem zylindrischen Rohr mit einem axial gespannten Draht von 0,2 mm Durchmesser. Der Draht wurde in der unteren Hartgummischeibe gehalten und reichte bis dicht an das Glimmerfenster *F*. Das Glimmerfenster selbst hatte einen Durchmesser von 1,5 cm und ein Luftäquivalent von 8,4 cm, um eine etwa vorhandene radioaktive Infektion der Absorptionsfolien unwirksam zu machen. Der Zähler wurde gewöhnlich mit Argon von Atmosphärendruck gefüllt. Die Zählspannung betrug dann etwa 4000 Volt. Der Spannungsbereich, innerhalb dessen α-Strahlen gezählt wurden, war bei diesem Druck relativ groß und betrug mehrere hundert Volt. Selbstverständlich waren die Schwierigkeiten beim Nachweis von Protonen erheblich größer. Es wurde daher die Spannung immer so weit gesteigert, daß die β-Strahlen eben nicht mehr störend wirkten. Eine ausreichende Spannungskonstanz war durch die Verwendung einer Trockenbatterie gewährleistet; außerdem wurde die Spannung durch ein elektrostatisches Voltmeter nach Lohfert[2]) kontrolliert, das bei einer Meßspannung von 4000 Volt noch Änderungen von 10 Volt abzulesen gestattete. Der Zähldraht war über einen Kondensator (2000 cm) mit einem Fünfröhrenverstärker verbunden, der das mechanische Addierwerk betätigte. Der relativ kleine Ableitwiderstand (10^5 Ohm) gibt der Anordnung das große Auflösungsvermögen, das für die Unterscheidung von Protonen und β-Teilchen von Wichtigkeit ist. Der hier beschriebene Zähler bietet nicht nur die Möglichkeit, Protonen in Gegenwart von β- und γ-Strahlen nachzuweisen, sondern er hat noch den Vorteil, daß die Stoßionisation durch die ganze Länge des Zählers hindurch erfolgt[3]). Dies erlaubt die Benutzung einer großen Zähleröffnung und auch die Auszählung eines stark divergenten Bündels. Beide Punkte sind aus Intensitätsgründen bei Versuchen über Kernumwandlung von größter Bedeutung.

Betrachtet man den Anodenstrom der letzten Röhre mit einem Oszillographen, so zeigt sich, daß auch bei Abwesenheit von Protonen der Faden

[1]) H. Zahn u. H. Geiger, siehe Handb. d. Phys. XXII [2], S. 163, 2. Aufl.

[2]) H. Lohfert, Tübinger Dissertation 1933.

[3]) Systematische Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die Protonen in Gegenwart von β- und γ-Strahlen um so leichter nachweisen lassen, je höher der Druck im Zähler ist. Dies ist durchaus nicht selbstverständlich, da durch die Erhöhung des Druckes ja auch die durch die β-Strahlung erzeugte Ionenzahl vermehrt wird.

des Oszillographen nicht vollkommen ruhig ist, er pendelt vielmehr entsprechend den statistischen Schwankungen der β-Strahlung des Präparats um die Ruhelage. Aus dieser Unruhe heben sich die Ausschläge der Protonen je nach ihrem Ionisierungsvermögen mehr oder weniger stark heraus. Das mechanische Addierwerk wurde so eingestellt, daß nur solche Ausschläge registriert werden, die erheblich größer sind als die β-Strahlenunruhe, da man sonst Gefahr läuft, β-Strahlen mitzuregistrieren. Es muß daher mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß die schnellsten Protonen nicht alle mitregistriert wurden. Eine genaue Feststellung des Wirkungsgrades des Zählers für die schnellsten Protonen stieß auf Schwierigkeiten. Es dürfen daher die im folgenden angegebenen Teilchenzahlen bzw. Ausbeuten nur als relative Zahlen aufgefaßt werden (s. auch § 4).

§ 4. Vorversuche mit H-Strahlen aus Paraffin. Mit Hilfe von natürlichen H-Teilchen aus Paraffin wurde die Apparatur geeicht, um festzustellen, wie tief ein H-Teilchen in den Zähler eindringen muß, um ihn zum Ansprechen zu bringen. Fig. 2 zeigt das Ende der Reichweitenkurve für solche natürlichen H-Teilchen aus Paraffin von 1 cm Luftäquivalent, ausgelöst durch α-Strahlen von Thor C′ bei voller Reichweite. Die H-Teilchen wurden in Aluminiumfolien absorbiert, deren Luftäquivalent durch Wägung bestimmt wurde, wobei 1,62 mg Aluminium pro Quadratzentimeter 1 cm Luft entsprach. Auf der Ordinate sind die Teilchenzahlen pro Minute und auf der Abszisse die Dicke der durchsetzten Absorptionsfolien in Luftäquivalenten aufgetragen. Im ganzen wurden für diese Kurve 1500 Teilchen gezählt. Das letzte Stück der Kurve ist nochmals in zehnfacher Überhöhung gezeichnet. Der mit einem vertikalen Strich versehene Punkt bei 24 cm wurde als Reichweitenende angenommen. Dieser Punkt entspricht nach den Messungen von Chadwick[1]) 40,5 cm. In der Fig. 2 ist deshalb eine zweite Abszissenskale derart eingezeichnet, daß das Reichweitenende bei 40,5 cm liegt. Da in der Festlegung des

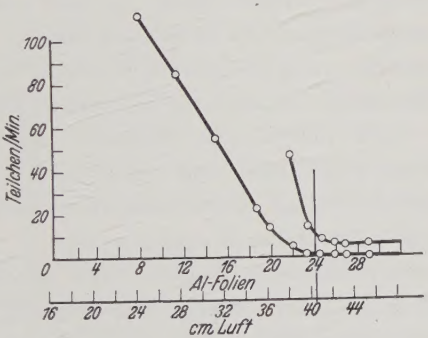

Fig. 2. Reichweitenkurve der natürlichen H-Teilchen aus Paraffin, ausgelöst durch α-Strahlen von Thor C′.

[1]) Mitgeteilt in der Arbeit von P. M. S. Blackett, Proc. Roy. Soc. London (A) **135**, 132, 1932.

Endpunktes der Reichweitenkurve von Fig. 2 eine gewisse Willkür nicht zu umgehen war, können die Abszissenangaben nur auf $\pm$ 1 cm als gesichert gelten. Die Vorabsorption von 16,5 cm rührt daher, daß die H-Strahlen zwei Glimmerfolien zu durchsetzen hatten, nämlich die Verschlußfolie des evakuierten Raumes von 6,4 cm und die Verschlußfolie des Zählers von 8,4 cm Luftäquivalent, außerdem mußten sie noch die zwischen den beiden Folien liegende Luftschicht (0,5 cm) sowie das vom Isolator begrenzte Stück im Innern des Zählers (0,8 cm) zurücklegen, ehe sie in den eigentlichen Zählraum gelangten.

Die Tatsache, daß die aus der Kurve 2 zu entnehmende Vorabsorption praktisch identisch ist mit der aus der Dicke der Glimmerfolien usw. errechneten Vorabsorption von 16,3 cm, zeigt, daß die H-Teilchen auch dann schon registriert werden, wenn sie nur ein sehr kurzes Stück in den Zähler eindringen. Man könnte danach vielleicht vermuten, daß alle Protonen, die den Zähler ganz durchsetzen, registriert werden müßten. Es ist aber zu bedenken, daß die geringe Eindringtiefe nur für das Bahnende der Protonen gemessen wurde, an dem bekanntlich das Ionisierungsvermögen am größten ist. Es ist deshalb damit zu rechnen, daß einzelne sehr rasche, also nur wenig ionisierende Protonen bei der Zählung übergangen wurden. Dies wird bei der späteren Deutung der Ergebnisse (§ 8) berücksichtigt werden.

§ 5. Beispiel einer Meßreihe. Nachdem das Glaskügelchen von etwa 3 mm Durchmesser und einer Wandstärke von meist 1 cm Luftäquivalent mit gereinigter Radiumemanation gefüllt war, wurde es abgeschmolzen und in den Halter H eingebaut (Fig. 1). Die Präparatstärke war bestenfalls etwa 10 Millicurie. Sodann wurde die Aluminiumfolie Al von 0,5 cm Luftäquivalent in die richtige Lage gebracht. Auf die Grundplatte G wurde ein Glassturz gesetzt und der Raum, in dem sich Präparat und Folie befanden, evakuiert, um zu verhindern, daß Protonen aus Stickstoff auftraten. Dann wurde bei kräftiger Protonenstrahlung die Zählerspannung so einreguliert, daß sich die β-Strahlen eben nicht mehr bemerkbar machten. Als zweckmäßig erwies es sich, den Zähler schon etwa 24 Stunden vor Beginn einer Messung an Spannung zu legen, denn nur so konnte eine vollständige Konstanz in der Arbeitsweise des Zählers erreicht werden. Die Gründe hierfür konnten nicht völlig geklärt werden. Nach Ablauf der eintägigen Frist wurde mit der Abzählung der Protonen begonnen. Bei der geringen Teilchenzahl (s. z. B. Fig. 3) dauerte die Durchmessung eines Kurvenzuges mehrere Tage. Eine zeitlich so ausgedehnte Messung war aber dadurch möglich, daß die einmal eingestellte Apparatur vollkommen konstant und ohne Wartung Tag und Nacht weiterlief.

Wegen der geringen Teilchenzahl konnte mit *einem* Präparat eine Kurve meist nicht vollständig oder nicht mit genügender Sicherheit durchgemessen werden. Es mußten daher Messungen mit mehreren Präparaten aneinander angeschlossen werden, wobei der wiederholt gemessene Kurvenanfangspunkt als Anschluß- bzw. Kontrollpunkt diente. Zur Erhöhung der Übersicht sind in den folgenden Figuren nur die Meßpunkte *einer* zusammenhängenden Meßreihe eingetragen; die Kurven aber entsprechen dem Mittel aus *allen* Messungen. So sind z. B. für jeden Punkt der Fig. 3 etwa 120 Teilchen gezählt, während die gesamte Kurve sich auf 5000 gezählte Teilchen stützt. Der natürliche Effekt (Nulleffekt) betrug bei Herstellung des Zählers 0,3 Teilchen pro Minute, stieg aber im Laufe der Monate auf 0,5 Teilchen an, was wahrscheinlich auf radioaktive Verunreinigung zurückzuführen ist. In den mitgeteilten Kurven ist der Nulleffekt bereits abgezogen.

§ 6. Messungen an Aluminium mit Emanationspräparaten. Die Fig. 3 bis 5 zeigen die Absorptionskurven der Protonen aus Aluminium bei Beschießung mit α-Strahlen verschiedener Reichweite. Die von den α-Strahlen durchsetzte Aluminiumfolie hatte ein Luftäquivalent von nur 0,5 cm, so daß nur die ersten 0,5 cm der α-Strahlenbahn zur Wirkung kamen. Die in den Fig. 3, 4 und 5 als Ordinaten angegebenen Teilchenzahlen sind auf eine Präparatstärke von 10 Millicurie reduziert. Auf Angabe der absoluten Ausbeute wurde aus dem in § 3 angegebenen Grunde verzichtet. Soweit Angaben über die Ausbeute möglich sind, sind sie am Schlusse dieses Paragraphen mitgeteilt.

Rechts von den Absorptionskurven der Protonen ist jeweils die Verteilungskurve der wirksamen α-Strahlen angegeben, und zwar ist auf der Ordinate die Anzahl der α-Strahlen aufgetragen, deren Reichweite den Abszissenangaben entspricht. Die Kurve wurde aus den bekannten Reichweiten unter Berücksichtigung der Absorption im Glas des Kügelchens berechnet.

Wir betrachten zunächst Kurve 3. Die Reichweiten der α-Strahlen wurden durch eine zylindrisch gebogene Glimmerfolie von 1,4 cm Luftäquivalent herabgesetzt, so daß sie maximal 4,6 cm betrugen. Zwei verschiedene Protonengruppen *A* und *B* treten deutlich heraus, deren Maximalreichweiten sich mit einer Genauigkeit von ± 1,5 cm zu 34 bzw. 62 cm Luft angeben lassen. Die Streuung der Reichweiten dieser beiden Gruppen, welche sich über etwa 15 cm erstreckt, kann nicht vollständig durch die unzulängliche Geometrie der Apparatur erklärt werden, da die hierdurch bedingten Unterschiede bei einer Reichweite von 50 cm höchstens 7 cm

betragen können. Man muß vielmehr annehmen, daß die Protonen schon bei ihrer Entstehung verschiedene Geschwindigkeiten besitzen, wofür die Inhomogenität der α-Strahlen verantwortlich sein wird. Wie aus der rechts stehenden Verteilungskurve der α-Strahlen zu ersehen ist, sind α-Strahlen mit Reichweiten von 3,5 bis 4,6 cm stark im Übergewicht vorhanden, während solche mit Reichweiten von 2,4 bis 3,5 cm nur schwach vertreten sind. Diese α-Strahlengruppe mit Reichweiten von 3,5 bis 4,6 cm muß auch im wesentlichen für die beobachtete Protonenemission verantwortlich sein. Allerdings sind auch α-Strahlen unter 2,4 cm in großer

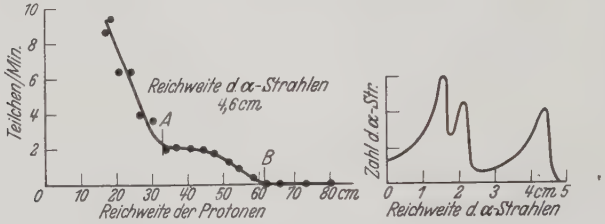

Fig. 3. Absorptionskurve der Protonen aus Aluminium, ausgelöst durch α-Strahlen von 4,6 cm Reichweite.

Zahl vertreten. Aus den Messungen von Chadwick und Constable[1]) ist aber zu entnehmen, daß α-Strahlen unter 2,4 cm keinen meßbaren Zertrümmerungseffekt geben, während nach Diebner und Pose[2]) die Grenze bei 2,1 cm liegt. Die entsprechende Protonengruppe hat nach Pose eine Reichweite von 47 cm in der Vorwärtsrichtung bzw. von etwa 40 cm, wenn man nach § 8 auf 90^0 umrechnet. Da Kurve 3 bei 40 cm Absorption einen horizontalen Verlauf zeigt, so folgt, daß unter meinen Versuchsbedingungen die von Pose vermutete Gruppe noch nicht oder nur in minimaler Intensität angeregt wird.

Die in Fig. 4 dargestellte Kurve wurde mit α-Strahlen bis maximal 5,2 cm Reichweite erhalten. Die Glimmerfolie, die bei Kurve 3 in den Weg der α-Strahlen eingeschaltet war, ist jetzt entfernt, und die noch erforderliche Abbremsung geschah durch Einlassen von Sauerstoff in den sonst evakuierten Raum unter der Glasglocke. Es ist zu erkennen, daß die Reichweiten beider Gruppen etwas zugenommen haben. Ferner ist das horizontale Stück nicht mehr so ausgeprägt wie bei Kurve 3, weil sich wahrscheinlich eine neue Reichweitengruppe zwischen die bereits vor-

[1]) J. Chadwick u. J. E. R. Constable, l. c.
[2]) K. Diebner u. H. Pose, ZS. f. Phys. **75**, 753, 1932.

handenen eingeschoben hat. Die Verteilung der α-Strahlen (rechte Kurve) zeigt, daß der Schwerpunkt der wirksamen α-Strahlen nunmehr im Reichweitenbereich von 4 bis 5,2 cm liegt. Außerdem können jetzt auch α-Strahlen kürzerer Reichweite bis maximal 3 cm wirksam sein, da auch solche Strahlen erheblich vertreten sind. Gerade diese Strahlen wird man für die Erhöhung der Teilchenzahl sowie für die Verwaschung des horizontalen Stückes der Kurve verantwortlich machen. Nach Versuchen von Chadwick und Constable erzeugen nämlich α-Strahlen bis zu 3 cm Reichweite zwei Protonengruppen von 22 und 49 cm Reichweite, wenn Protonen- und α-Strahlrichtung zusammenfallen. Rechnet man nach dem in § 8 an-

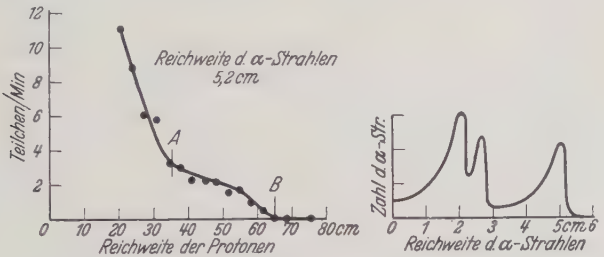

Fig. 4. Absorptionskurve der Protonen aus Aluminium, ausgelöst durch α-Strahlen von 5,2 cm Reichweite.

gegebenen Verfahren diese Reichweiten auf die hier benutzte Anordnung (Protonenstrahl senkrecht α-Strahl) um, so sind Reichweiten von 17,5 und 40,5 cm zu erwarten. Eine Andeutung der Protonen mit 40,5 cm Reichweite ist vorhanden.

In der nächsten Fig. 5 sind die Ergebnisse mit α-Strahlen bis zu 6 cm Reichweite dargestellt. Die Zahl der Protonen unter 20 cm Reichweite hat sich gegenüber Kurve 3 mehr als verdreifacht. Außerdem haben die beiden Gruppen *A* und *B* an Reichweite zugenommen und greifen bereits übereinander, so daß nur noch die größte Reichweite (Gruppe *B*) ausgemessen werden kann. Es ergibt sich dafür ein Wert von 78 cm. Die Verteilung der α-Strahlen (rechte Kurve) zeigt, daß Reichweiten von 2 bis 4 cm und von 5 bis 6 cm am meisten vertreten sind. Wenig vorhanden sind Reichweiten zwischen 4 und 5 cm. Dem ist zuzuschreiben, daß die kürzere Gruppe *A* einen Knick aufweist (vgl. auch § 8). Um den Verlauf der Kurve 5 in ihrem ersten Teil (bis etwa 40 cm) möglichst genau zu erfassen, wurde eine Meßreihe durchgeführt, bei der jeder einzelne Punkt mit annähernd 1000 gezählten Teilchen belegt wurde und außerdem zwischen die eingezeichneten Punkte noch je ein weiterer Meßpunkt eingelegt wurde. Auch diese Kurve ließ weitere Einzelheiten, als sie schon aus Kurve Fig. 5

ersichtlich sind, nicht erkennen. Die Geometrie meiner Anordnung war allerdings derart, daß Reichweitendifferenzen von 4 bis 5 cm, wie sie von Chadwick und Constable beobachtet worden sind, gerade nicht mehr hätten erkannt werden können.

Für die absoluten Ausbeuten läßt sich, wie zu Beginn dieses Paragraphen betont wurde, nur eine untere Grenze angeben. Unter Ausbeute ist dabei wie üblich die Zahl der in den ganzen Raumwinkel emittierten Protonen verstanden unter der Annahme, daß nach allen Richtungen gleichviel Protonen emittiert werden. Aus den Versuchen errechnet sich, daß ein α-Strahl mit einer Reichweite zwischen 3,6 und 4,6 cm auf seinem

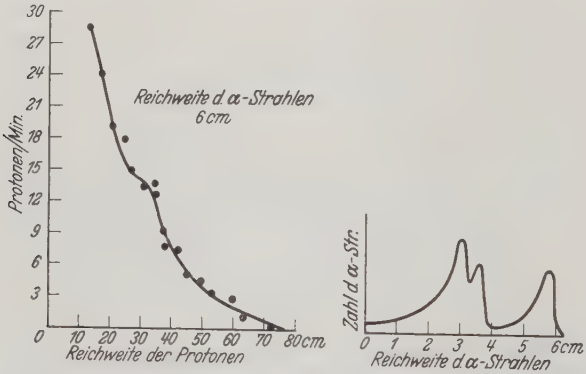

Fig. 5. Absorptionskurve der Protonen aus Aluminium, ausgelöst durch α-Strahlen von 6,0 cm Reichweite.

Weg in einer 0,5 cm Luftäquivalent dicken Aluminiumfolie mindestens $2 \cdot 10^{-7}$ Protonen erzeugt, wobei die Richtung des Protons senkrecht zur Richtung des α-Strahls verläuft. Aus den Angaben von Chadwick und Constable errechnet man für dieselbe Foliendicke eine Ausbeute von über $3{,}7 \cdot 10^{-7}$ Protonen pro α-Strahl. Dabei haben allerdings die α-Strahlen eine Reichweite zwischen 2,7 und 3,9 cm, und die Protonenrichtung fällt mit der α-Strahlenrichtung zusammen. Es muß dahingestellt bleiben, ob die hier gefundene geringere Ausbeute auf experimentelle Mängel zurückzuführen ist oder aber im Wesen der Sache begründet ist.

§ 7. Messungen an Aluminium mit Thor C. In Fig. 6 sind die Versuchsergebnisse mit α-Strahlen von Thor C dargestellt. Zwei Drittel der wirksamen α-Strahlen besitzen Reichweiten von 8,6 cm und ein Drittel solche von 4,8 cm. Leider war die zur Verfügung stehende α-Strahlenquelle sehr schwach. Im günstigsten Falle konnte ein γ-Strahlenäquivalent von 0,9 mg erhalten werden, während die geringe β- und γ-Strahlenempfindlichkeit des Zählers

die Verwendung von Präparaten bis zu 15 mg zugelassen hätte. Erschwerend wirkte, daß der Thoriederschlag wesentlich schneller abklingt als die Emanation. Den Messungen mit Thor C kommt aber eine große Bedeutung zu, weil die α-Strahlen dieses Präparates die größte zur Verfügung stehende Reichweite besitzen. Außerdem kann hier mit α-Strahlen einheitlicher Reichweite gearbeitet werden.

Die Versuchsanordnung entsprach der in Fig. 1 dargestellten, nur war hier das Emanationskügelchen durch einen pilzförmigen, mit Thor B + C aktivierten Messingstift ersetzt. Es können jetzt Protonen, die unter Winkeln von 70 bis 100° gegen die α-Strahlrichtung emittiert werden, in den Zähler gelangen, während vorher der Winkelbereich 90 bis 150° betrug.

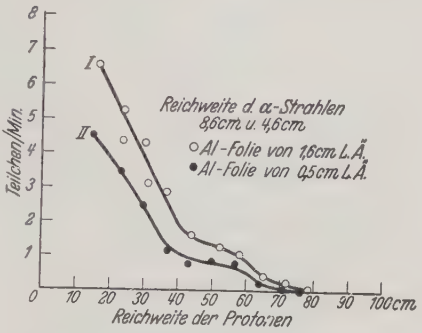

Fig. 6. Absorptionskurven der Protonen aus Aluminium, ausgelöst durch α-Strahlen von 8,6 cm Reichweite.

Die in Fig. 6 eingezeichnete Kurve I gibt die Messungen mit einer Aluminiumfolie von 1,6 cm, Kurve II die Messungen mit einer Folie von nur 0,5 cm Luftäquivalent wieder. Wegen der geringen Präparatstärke konnten für die einzelnen Meßpunkte nur noch etwa 100 Teilchen gezählt werden. Beide Kurven zeigen einen kontinuierlichen Abfall der Teilchenzahl bis zu einer Absorption von 40 cm, sodann nimmt die Teilchenzahl besonders bei Kurve II zunächst nur wenig ab, um sich bei etwa 65 cm ziemlich plötzlich zu vermindern, ohne jedoch ganz auf den Wert des Nulleffektes abzusinken. Bei 80 cm war die Zahl der Teilchen bereits so gering, daß sie nicht mehr mit Sicherheit festgestellt werden konnte. Bemerkenswert ist ferner noch, daß Protonen mit Reichweite zwischen 20 und 40 cm viel häufiger auftreten, als dies vorher bei Erregung mit Radiumstrahlen der Fall war.

§ 8. Darstellung der Versuchsergebnisse. Um die vorliegenden Messungen mit denen anderer Beobachter vergleichen zu können, ist eine Umrechnung ihrer Versuchsresultate auf die hier benutzte Strahlengeometrie nötig; denn die Mehrzahl der früheren Messungen mit Aluminium wurde an den nach vorwärts ausgelösten Protonen ausgeführt. Aus zahlreichen Versuchen[1])

[1]) E. Rutherford u. J. Chadwick, Phil. Mag. **44**, 417, 1922; W. Bothe, ZS. f. Phys. **63**, 381, 1930; H. Pose, ebenda **67**, 194, 1931.

weiß man, daß sich die Protonenreichweite erheblich mit dem Emissionswinkel ändert, und zwar nimmt die Reichweite ab, wenn der Winkel zwischen Proton und α-Strahl größer wird. Die Abhängigkeit der Reichweite vom Winkel läßt sich mit Hilfe von Energie und Impulsbetrachtungen errechnen, wenn man annimmt, daß bei dem Emissionsvorgang das α-Teilchen vom Kern eingefangen wird und daß die Energietönung des Prozesses für alle Emissionsrichtungen dieselbe ist. Bei meinen Versuchen ist der kleinste Winkel zwischen Proton und α-Strahl 90°, so daß man annehmen muß, daß die größten beobachteten Reichweiten dem Emissionswinkel 90° zukommen. Da nur diese Maximalreichweiten gemessen wurden, werden die folgenden Betrachtungen auf die senkrecht zur Richtung der α-Strahlen emittierten Protonen beschränkt. Für diesen Fall vereinfachen sich manche Rechnungen erheblich, selbst gegenüber dem Fall, daß Proton und α-Strahl dieselbe Richtung haben.

Bedeuten v und v' die Geschwindigkeit des Protons in der α-Strahlrichtung bzw. senkrecht dazu und V die Geschwindigkeit des auslösenden α-Teilchens, so ergibt sich aus Impuls und Energiebetrachtungen:

$$v'^2 = v^2 - \frac{2M}{m+4} \cdot v \cdot V. \tag{1}$$

Dabei bedeuten M und m die Atomgewichte des α-Teilchens und des Aluminiumkerns. Mit dieser Beziehung können also die Versuchsergebnisse einer Vorwärtsanordnung auf die hier benutzte rechtwinklige Anordnung umgerechnet werden. Obwohl sich aus den Versuchen die Reichweiten und nicht die Geschwindigkeiten ergeben, ist eine Umformung des obigen Ausdrucks nicht vorgenommen, da sich kein einfacher Ausdruck für den Zusammenhang zwischen Reichweite und Geschwindigkeit angeben läßt. Es wurde vielmehr auf die Tabelle von Blackett[1]) zurückgegriffen, die sich teils auf theoretische Überlegungen, teils auf experimentelle Daten stützt.

Bezeichnen E_α, E_p und E_k die kinetischen Energien von α-Teilchen, Proton und neugebildetem Kern und ist Q die bei dem Prozeß auftretende Energietönung, so ist:

$$E_\alpha + Q = E_p + E_k. \tag{2}$$

Beträgt der Winkel zwischen α-Strahl und Proton 90°, so läßt sich mit Hilfe der Impulsbeziehung die Energie E_k eliminieren und man erhält folgende Beziehung:

$$E_\alpha = \frac{m-1}{m+4} \cdot E_\alpha + \frac{m+3}{m+4} \cdot Q. \tag{3}$$

[1]) P. M. S. Blackett, Proc. Roy. Soc. London (A) **135**, 132, 1932.

Diese einfache Gleichung erlaubt eine übersichtliche Darstellung der Versuchsergebnisse.

In Fig. 7 sind die Energien E_p und E_α in eVolt, als Ordinaten bzw. als Abszissen aufgetragen. Neben den Energieskalen sind die entsprechenden Reichweitenskalen aufgezeichnet, so daß direkt die im Experiment gefundenen Reichweiten eingetragen werden konnten. Die mit Kreisen bezeichneten Werte sind den Messungen von Chadwick und Constable[1]) entnommen, nachdem sie in der oben angegebenen Weise auf 90° umgerechnet worden sind. Die Punkte dagegen stellen die hier gewonnenen Werte dar. Durch die Meßpunkte lassen sich mit befriedigender Annäherung zwei Gerade a und b legen. Dies besagt nach Gleichung (3), daß die Energietönung Q konstant ist, aber verschieden für Gruppe A und Gruppe B. Die Neigung der beiden Geraden stimmt mit der aus Gleichung (3) zu erwartenden Neigung

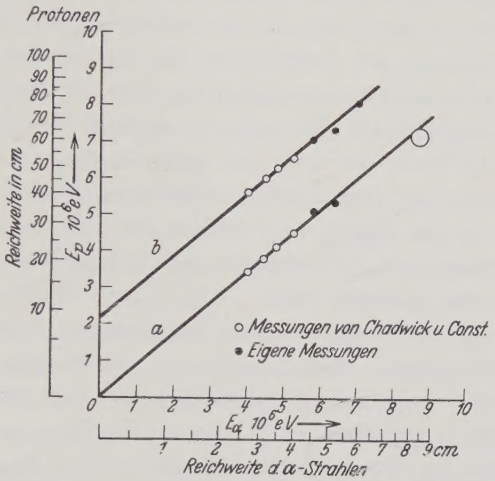

Fig. 7. Darstellung der Versuchsergebnisse in einem Energiediagramm.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{m-1}{m+4} = \frac{26}{31}$$

überein. Ferner ist in Fig. 7 noch ein weiterer durch einen großen Kreis markierter Meßwert eingetragen. Dieser Wert ist der in § 7 mitgeteilten Thor C-Kurve entnommen und entspricht der Reichweitengruppe, die dort bei etwa 65 cm angedeutet ist. Auch dieser Wert liegt auf der Geraden a. Dies spricht dafür, daß die Gruppe A auch noch bei α-Strahlen von 8,6 cm Reichweite auftritt. Die entsprechende Gruppe B, die etwa 100 cm Reichweite haben müßte, konnte jedoch nicht gefunden werden, was aber möglicherweise nur auf mangelnde Intensität zurückzuführen ist.

Es ist jetzt aber noch die Frage zu diskutieren, ob außer den durch die beiden Geraden a und b dargestellten Emissionsprozessen auch noch

[1]) J. Chadwick u. J. E. R. Constable, l. c.

andere möglich sind. Chadwick und Constable zeigen, daß bei α-Strahlen unter 3,9 cm Reichweite tatsächlich nur solche Protonen emittiert werden, deren Reichweite entweder durch Gerade *a* oder die Gerade *b* dargestellt werden kann. Meine Messungen sprechen dafür, daß dies auch bei α-Strahlen über 3,9 cm Reichweite der Fall ist. Die Kurven Fig. 3 und 4 zeigen nämlich sehr deutlich, daß nur die beiden Gruppen *A* und *B* vorhanden sind. Die Streuung der Reichweiten bei beiden Gruppen entspricht gerade der Streuung der erzeugenden α-Strahlen. Bei Kurve 5 bestehen die anregenden α-Strahlen aus zwei Gruppen, dadurch wird Kurve 5 weniger übersichtlich. Aber auch hier treten nur solche Protonen der Gruppen *A* und *B* auf, die nach den vorhandenen α-Strahlenreichweiten zu erwarten sind. So ist z. B. das Fehlen der Protonen mit Reichweiten von etwa 30 cm dadurch zu erklären, daß α-Strahlen mit Reichweiten zwischen 4 und 5 cm nur sehr wenig vertreten sind.

Die Energietönungen der Gruppen *A* und *B* lassen sich aus Fig. 7 entnehmen. Nach Gleichung (3) entsprechen nämlich die Schnittpunkte der Geraden mit der Ordinatenachse nach Multiplikation mit 31/30 direkt den Energietönungen *Q*. Für die Gruppe *A* ergibt sich etwa der Wert Null und für Gruppe *B* etwa $2{,}3 \cdot 10^{+6}$ eVolt. Diese Energietönungen sind aber nach unseren heutigen Vorstellungen nichts anderes als der Unterschied zwischen dem Energieniveau, auf dem das α-Teilchen eingefangen wird, und dem Niveau, aus dem das Proton gehoben wird. Man kann also die Protonenemission durch α-Strahlen jedenfalls bis 6 cm Reichweite durch zwei energetisch verschiedene Kernprozesse erklären.

Die Versuche mit α-Strahlen von Thor C und C′ zeigen aber eine weitere bisher noch nicht besprochene Erscheinung. Es treten nämlich neben den bereits erwähnten Protonen von 65 cm Reichweite (Gruppe *A*) noch Protonen mit Reichweiten zwischen 20 und 40 cm in weit größerer Zahl auf. Diese Protonen können wir aus Intensitätsgründen nicht der α-Strahlengruppe von 4,8 cm zuordnen, wir sind vielmehr zu der Annahme gezwungen, daß sie von den α-Strahlen mit 8,6 cm Reichweite herrühren. Dies zeigt sich auch darin, daß diese kurzreichweitigen Protonen nicht mehr auftreten, wenn die Reichweite der α-Strahlen auf 6 cm abgebremst wird. Auch Rutherford und Chadwick[1]) fanden bei ihren Szintillationsmessungen mit α-Strahlen von 7 cm Reichweite eine große Zahl kurzreichweitiger Protonen. Sie machten außerdem noch die interessante Feststellung, daß

---

[1]) E. Rutherford u. J. Chadwick, Proc. Cambridge Phil. Soc. **25**, 186, 1929.

diese Protonen eine Mindestreichweite von etwa 12 cm besitzen. Aus meinen Versuchen geht hervor, daß die Ausbeute an solchen kurzreichweitigen Protonen vier- bis fünfmal größer ist, als sie für die Gruppen A und B bei Erregung mit α-Strahlen bis 6 cm Reichweite gefunden wurde; außerdem ist die Energietönung bei der Emission dieser kurzreichweitigen Protonen negativ, d. h. nur ein Teil der Energie des α-Teilchens wird von dem Proton übernommen, ein erheblicher Energiebetrag mindestens $2 \cdot 10^6$ eVolt wird anderweitig verbraucht. Für die Entstehung dieser kurzreichweitigen Protonen lassen sich nur Vermutungen angeben.

§ 9. Zusammenfassung. Die Energieverhältnisse bei der Protonenemission von Aluminiumkernen wurden untersucht. Die Versuche wurden mit α-Strahlreichweiten zwischen 4,6 und 8,6 cm ausgeführt. Zum Nachweis der Protonen diente eine elektrische Zählmethode. Die Arbeitsweise des Zählers beruhte auf dem Prinzip der Stoßmultiplikation; der Zähler gestattete auch bei Gegenwart intensiver β- und γ-Strahlen Protonen nachzuweisen. Die Versuche ergaben, daß die Protonen aus Aluminium in zwei Gruppen verschiedener Reichweite emittiert werden. Mit zunehmender α-Strahlenreichweite nehmen auch die Reichweiten der Protonengruppen zu, und zwar so, daß die beiden Protonengruppen je einem Kernprozeß zugeschrieben werden können. Die Energietönungen für die beiden Prozesse ergeben sich, in Übereinstimmung mit den Versuchen von Chadwick und Constable, die α-Strahlen bis zu 3,9 cm Reichweite benutzten, zu etwa 0 und $2{,}3 \cdot 10^6$ eVolt. Bei α-Strahlen von 8,6 cm Reichweite treten noch Protonen kürzerer Reichweite auf, die einem dritten Prozeß zugeschrieben werden müssen. Die Energietönung für diese Protonen ist negativ (etwa $2 \cdot 10^6$ eVolt).

Um einen Resonanzeffekt in der Art, wie Chadwick und Constable für α-Strahlen bis 3,9 cm Reichweite fanden, mit Sicherheit festzustellen, reichte das Auflösungsvermögen der Anordnung nicht aus.

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Tübingen durchgeführt. Herr Professor Dr. Geiger gab die Anregung zu dieser Arbeit. Ihm bin ich zu größtem Dank verpflichtet. Er hat mir seine, in gemeinsamer Arbeit mit Herrn Professor Dr. Zahn in Kiel, ausgearbeitete Zählanordnung überlassen. Es ist mir eine Freude, Herrn Professor Dr. Geiger auch an dieser Stelle danken zu können für sein förderndes Interesse und seine vielen Ratschläge im Verlauf der Arbeit.

Lebenslauf.

Als Sohn des im Weltkrieg gefallenen Kaufmanns Karl Haxel, wurde ich, Otto Haxel, am 2. April 1909 in Neu-Ulm a. D. geboren. Dort besuchte ich die Grundschule und trat im Jahre 1918 in die Realschule ein. Im Frühjahr 1924 trat ich in die Oberrealschule Ulm über und bestand dort Ostern 1927 die Reifeprüfung. Nach einer halbjährigen freiwilligen praktischen Tätigkeit in der Feuerwehrgeräte- und Automobilfabrik Magirus in Ulm, widmete ich mich dann an der Technischen Hochschule zu München dem Studium der technischen Physik und vom Jahre 1930 ab dem Studium der reinen Physik an der Universität Tübingen.